新疆和周边“一带一路”地区不同云天条件下地表太阳辐射

孙琳琳[1]，刘 琼[1]，黄 观[2]，陈勇航[1]，魏 鑫[1]，
郭玉琳[3]，张太西[3]，高天一[1]，许赟红[1]

（1. 东华大学环境科学与工程学院，上海　201620；2. 西安外国语大学旅游学院人文地理研究所，
陕西 西安　710128；3. 新疆气象局气候中心，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：基于CERES Aqua FM3 Edition4A SSF数据集，对新疆和周边“一带一路”地区2002—2022年无云和有云条件下地表太阳辐射时空变化特征进行分析。结果表明：（1）研究区多年平均太阳辐射高值区均出现在新疆南部、青藏高原、巴基斯坦中北部等地区，无云、有云条件下的最高辐照度分别为1029 W·m^{-2}、789 W·m^{-2}；低值区主要出现在天山山脉、巴基斯坦北部、塔吉克斯坦北部，最低辐照度分别为117 W·m^{-2}、314 W·m^{-2}，有云条件下太阳辐射的变化幅度更小。（2）2002—2022年研究区无云与有云条件的年均太阳辐射分别以0.36 W·m^{-2}、0.39 W·m^{-2}的速率增长。2003—2022年，无云与有云条件下年均辐照度的最高值分别出现在2005年（759.32 W·m^{-2}）、2016年（599.70 W·m^{-2}），最低值分别出现在2016年（740.43 W·m^{-2}）、2010年（578.31 W·m^{-2}）。（3）无云条件下大部分区域的辐照度比有云时高100~200 W·m^{-2}，差值较大的区域主要分布于天山山脉、青藏高原北部、昆仑山脉、喜马拉雅山脉、塔吉克斯坦、阿富汗东部等地势较高的地区，差值最大为505.76 W·m^{-2}。

关键词：地表太阳辐射；云；时空变化；CERES；新疆和周边“一带一路”地区

太阳能作为新型清洁能源的代表，对优化能源结构和提升环境质量具有重要的意义[1]。作为一种高效的太阳能利用形式，光伏发电以其清洁、高效和低维护成本的特点，正逐渐成为推动能源转型和环境改善的关键技术[2]。其通过直接将太阳光转换为电能，不仅提升了能源的利用效率，也对实现可持续发展目标做出了积极贡献[3]。

太阳辐射是光伏发电能量的来源，深入了解其时空分布对于光伏电站的规划和运营至关重要。已有相关学者针对不同地区展开了研究，刘莹等[4]利用河西走廊东部及周边气象观测资料，分析该区域总辐射的时空变化特征。顾玮等[5]基于1980—2015年中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集（TPCAS）和30个气象观测站点的资料，发现新疆南疆太阳总辐射有明显的年际变化特征且总体呈现增长趋势。杨凤娟等[6]采用新疆2017年CERES（Clouds and the Earth's Radiant Energy System，CERES）辐射数据，揭示了不同季节南疆与北疆辐照度的差异。于涵等[7]基于2000—2014年的Aqua/CERES卫星产品，研究了青藏高原地表有效辐射的时空分布。Habiba等[8]使用巴基斯坦部分地区的气候数据估算当地的太阳辐射。与此同时，诸多研究表明，云的存在是引起地面太阳辐射不确定性的关键因素[9-11]，其对太阳辐射的影响在不同下垫面特征和气候条件下呈现出显著差异。秦放等[12]利用CERES数据得出中国大陆地区太阳辐射受云的影响显著，呈现出北部弱南部强的整体区域性分布差异。Si等[13]利用2003—2016年CERES Aqua Edition 3A数据分析了东亚地区，发现单层低云的降温作用在西北部地区整体呈减弱趋势，而在其他地区整体呈增强趋势。张淑花等[14]采用适用于山区的地表太阳辐射模型对西北昆仑山提孜那甫河流域

收稿日期：2024-04-11；　**修订日期**：2024-06-26
基金项目：上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划项目（2022E01047）；国家自然科学基金项目（42030612，41675026，41375021）
作者简介：孙琳琳（2000-），女，硕士研究生，主要从事大气环境与遥感. E-mail: qxsunll@163.com
通讯作者：陈勇航. E-mail: yonghangchen@dhu.edu.cn

地表太阳辐射时空分布进行估算,并探讨地形和云对太阳辐射的影响,发现周围地形阻挡对地表太阳辐射空间分布的影响最显著,高程和云次之。

综上,现有研究主要集中在新疆、青藏高原等局部地区,而关于本文研究区——新疆和周边“一带一路”地区的研究相对较少。据Chen等[15]评估,共建“一带一路”国家的年发电潜力总量达448.9 PWh,若开发利用3.7%的光伏发电潜力,即可满足整个地区2030年的电力需求,太阳能开发潜力巨大。新疆和周边“一带一路”地区地域广阔,下垫面类型多样,包括沙漠、戈壁、草地、耕地、城市等,这些不同的地表特征对云的分布及其对太阳辐射的影响产生了显著的区域性差异。因此,本文针对新疆和周边“一带一路”地区,通过探讨无云及有云条件下太阳辐射的时空变化特征,揭示云对太阳辐射的影响。以期研究结果可增强太阳辐射预测的精准度和光伏电站的运行效率,能为该地区的太阳能资源评估、光伏建设规划提供科学依据,进而推动区域能源的可持续发展与高效利用。

1 数据与方法

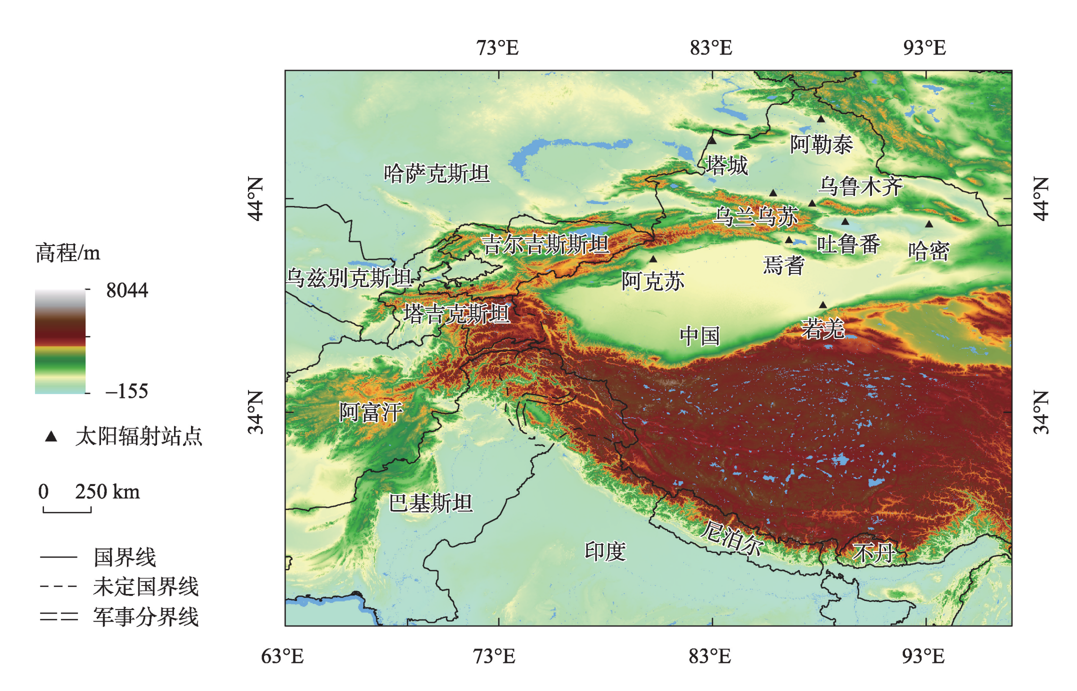
1.1 研究区概况

本文研究区涵盖了24°~50°N和63°~97°E之间的广阔地域,包括我国新疆和周边吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、哈萨克斯坦、巴基斯坦等地区(图1)。其中,新疆日照时数和辐射量位居全国前列,统计数据显示,新疆的年平均日照时数超过2800 h,平均辐射量高达1800 kW·h·m^{-2}[16]。

1.2 数据介绍

CERES使用由三个通道组成的扫描辐射计测量宽带辐射,包括短波(shortwave flux,SW,0.2~5 μm)、长波(Longwave flux,LW,8~12 μm)和总辐射(0.2~200 μm)。CERES Aqua FM3 Edition4A SSF产品包括来自模型A晴空条件下Li算法的太阳辐射数据集和模型B全天空条件下兰利参数化短波辐射算法(LPSA)两种数据集。

Li短波辐射算法在晴空条件下对地面辐射进行反演,与Li算法的短波辐射相比,杨凤娟[17]发现LPSA短波辐射与新疆地面观测太阳辐射结果的拟合结果更好。马蓉蓉等[18]通过对比相关数据(GLAS等)发现,除极地外,CERES数据准确率较高,是目前对辐射通量观测精度较高的卫星资料。尽管太阳辐射的波长范围广泛,但绝大部分能量集中在250~2500 nm范围内,短波辐射约占太阳总辐射量的99%[19]。因此,短波辐射可以有效的反映太阳辐射[20]。基于此,本研究选择了2002—2022年CE-



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2016)1666号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区及地面观测太阳辐射站点分布

Fig. 1　Study area and distribution of ground observation solar radiation stations

RES Aqua FM3 Edition4A SSF 数据产品中以 LPSA 为核心算法、空间分辨率约为 20 km 的"CERES downward SW surface flux—Model B"数据集进行研究，2002年1—6月数据缺失。对于晴空与有云条件的划分，本文参考 CERES SSF 数据集中参数说明，将云量<5%时对应辐射观测数据认为是晴空条件下的观测结果，将云量≥5%对应的辐射观测数据认为是有云条件下的观测结果[6]。

LPSA 算法依靠简单的物理关系来估计地球大气在晴天和多云天空条件下对短波辐射的衰减[21]。在该算法中，向下短波表面通量被定义为：

$$F_{sd} = F_{toa} T_a T_c \quad (1)$$

式中：F_{toa} 表示相应大气层顶辐射通量（W·m^{-2}），T_a 代表晴天透射率（%），T_c 代表云透射率（%）[22-23]，计算公式如下：

$$T_a = (1 + B)\exp(-\tau_z) \quad (2)$$

式中：B 表示大气（气体和气溶胶）对地表反射辐射的散射系数，τ_z 是太阳天顶角 z 处的宽带消光光学厚度，其可以解释透明大气中的吸收和反向散射。

$$T_c = 0.05 + 0.95\left[\frac{R_{ovc} - R_{meas}}{R_{ovc} - R_{clr}}\right] \quad (3)$$

式中：R_{ovc}、R_{clr} 和 R_{meas} 分别代表阴天、晴天和瞬时测量的 TOA 反射率值。

2 结果与分析

2.1 无云条件下太阳辐射时空分布特征

2.1.1 空间分布特征 无云条件，2002—2022年研究区平均太阳辐射随纬度的增加从南向北逐渐减弱，南部地区的太阳辐射资源尤为丰富（图2）。2002—2022年太阳辐射平均值为745.43 W·m^{-2}，高值区位于新疆南部、青藏高原、巴基斯坦中北部以及阿富汗中部等地，其中最高辐照度可达1028.56 W·m^{-2}，低值区则主要分布于天山山脉、巴基斯坦北部、塔吉克斯坦北部以及吉尔吉斯斯坦等地，最低为117.43 W·m^{-2}，最大变化幅度达到911.13 W·m^{-2}。结合研究区高程图可以发现（图1），上述空间分布特征受到海拔高度的影响，海拔较高的地区地面接收到的太阳辐射量较多。塔里木盆地太阳辐射高值中心的形成与塔克拉玛干沙漠的地表沙尘气溶胶密度有关，沙尘气溶胶的显著散射特性能够提升塔里木盆地的辐照度[24]。

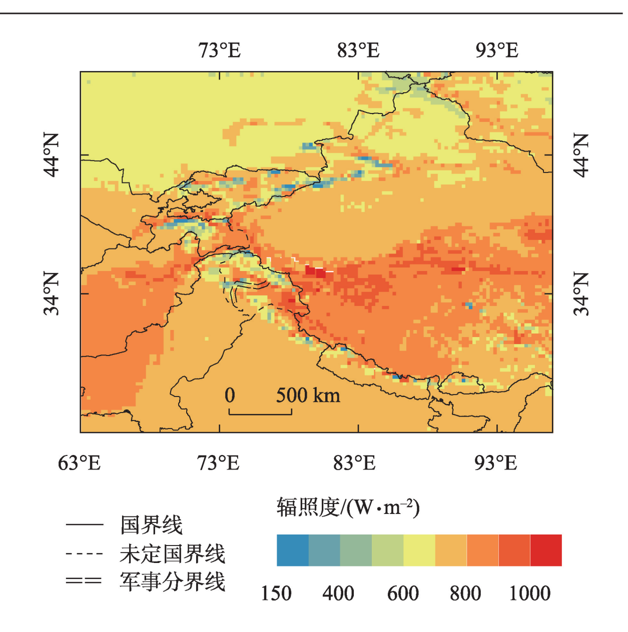


图2 无云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions from 2002 to 2022 under cloudless condition

进一步探讨无云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射的季节空间分布情况（图3）。依据气象学的四季划分标准，3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，冬季为12月—次年2月。由图3可知，夏季辐照度（926.81 W·m^{-2}）最高，春季（869.33 W·m^{-2}）、秋季（665.30 W·m^{-2}）次之，冬季（524.51 W·m^{-2}）最低，其中，夏季的辐照度比冬季高401.30 W·m^{-2}。太阳辐射在4—8月较高，在1月、11月、12月较低。6月辐照度平均值最大，为953.56 W·m^{-2}，其次是5月、7月，辐照度分别为941.22 W·m^{-2}、932.01 W·m^{-2}。5—8月辐照度差异不大，均在164~1128 W·m^{-2}之间，3—10月最大辐照度均超过1000 W·m^{-2}。2月、3月、11月、12月辐照度最低值都低于100 W·m^{-2}，其中12月的最低辐照度仅为21 W·m^{-2}（图4）。

上述太阳辐射分布特征的形成主要归因于太阳高度角的季节变化，同时也受气候条件、气溶胶颗粒特征以及气溶胶负荷等因素的影响[25]。春季气候干燥，沙尘天气频繁，这导致粗粒子含量和气溶胶负荷增加，从而降低了辐射水平。秋季水汽量大、下垫面植被覆盖度高，辐射弱于春季。冬季日照时长的显著减少和太阳高度角的降低成为影响太阳辐射强度的主导因素，还与冬季采暖期人为气

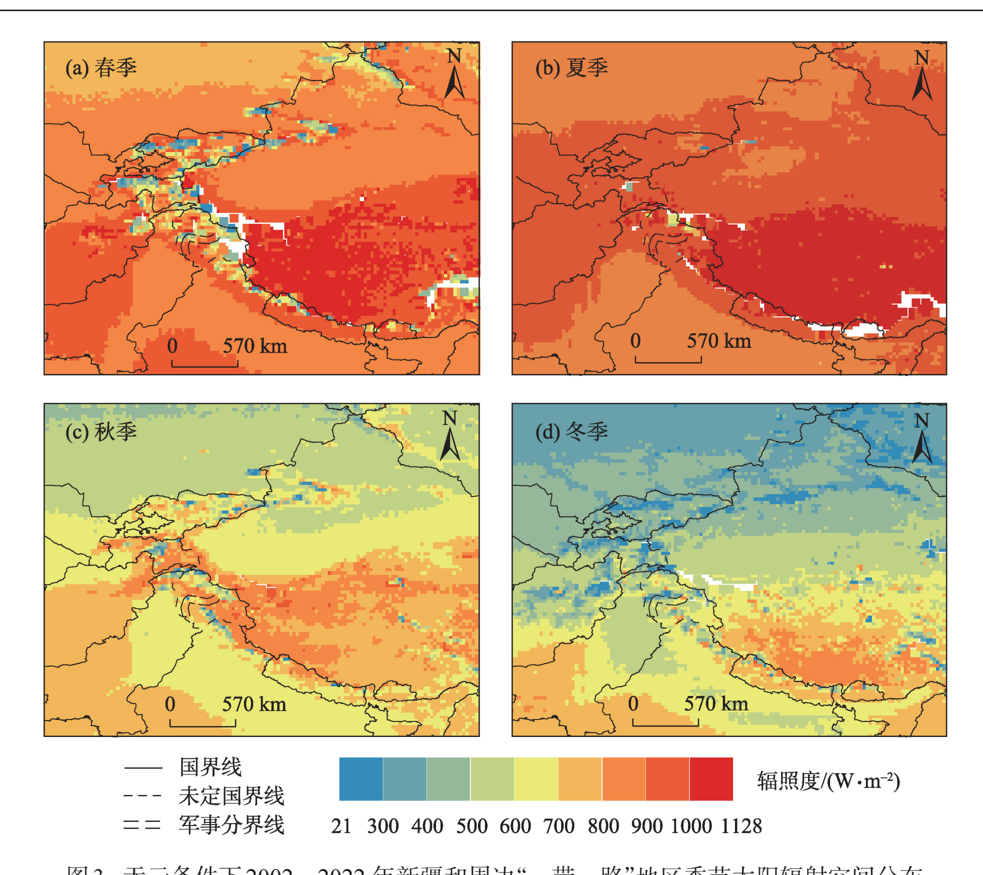


图3 无云条件下2002—2022年新疆和周边“一带一路”地区季节太阳辐射空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of seasonal solar radiation in Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions during 2002−2022 under cloudless condition

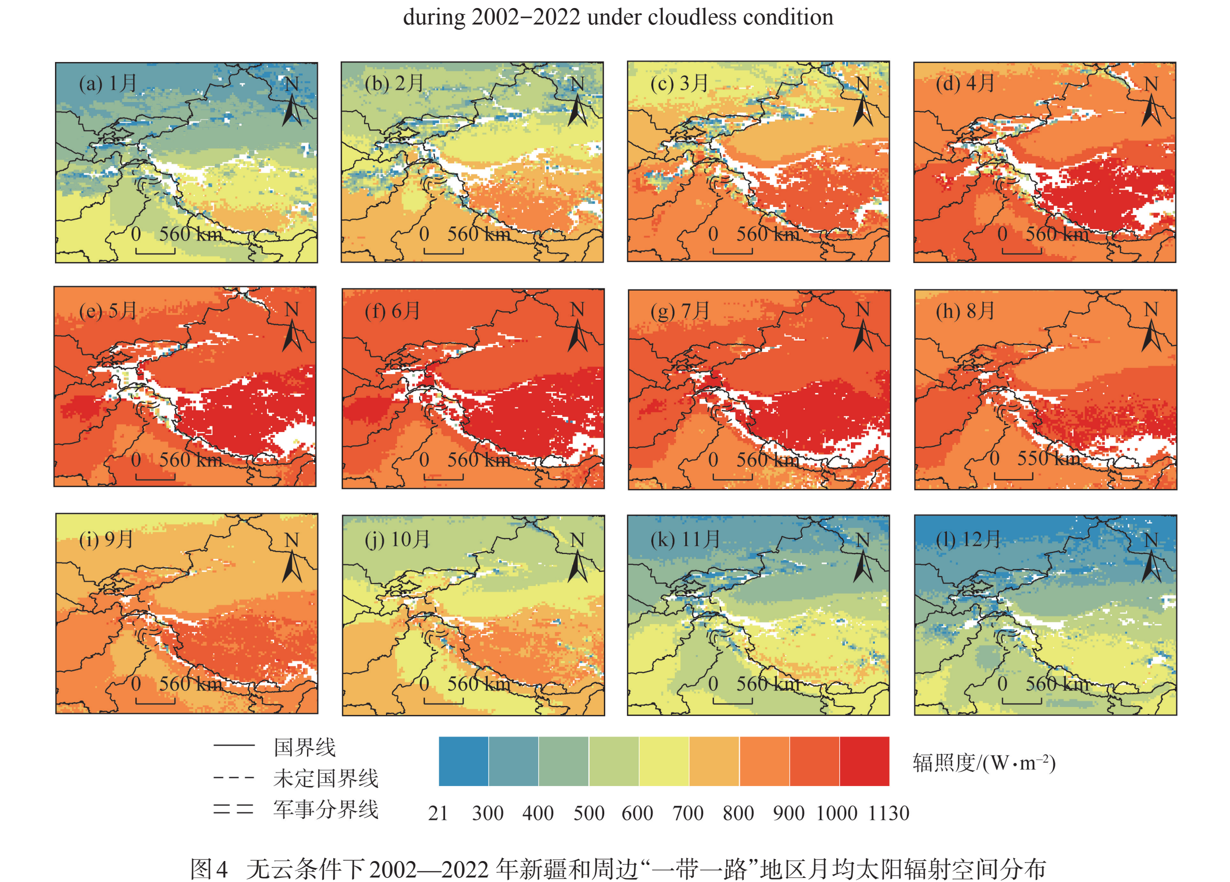


图4 无云条件下2002—2022年新疆和周边“一带一路”地区月均太阳辐射空间分布

Fig.4 Spatial distribution of monthly mean solar radiation in Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions during 2002−2022 under cloudless condition

溶胶排放增加有关[26]。此外，下垫面特征和大气透明度等因素也对太阳辐射的季节性差异起到重要作用[27]。

2.1.2 时间变化 从有云条件下太阳辐射的年际变化可知(图5a)，2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射平均辐照度为745.09 W·m^{-2}，太阳辐射整体呈上升趋势，年均辐照度以0.36 W·m^{-2}的速率增长。由于2002年CERES卫星太阳辐射数据出现较大部分的缺失，因此围绕2003—2022年太阳辐射数据展开分析。可以发现，辐照度整体年际变化不大，2003—2022年年均辐照度最低值出现在2016年，为740.43 W·m^{-2}，最高值出现在2005年，为759.32 W·m^{-2}，两者相差18.89 W·m^{-2}。由图5b可以看出，2003—2022年太阳辐射距平值的最大值出现在2004年，为11.20 W·m^{-2}，最小值出现在2012年，为−6.67 W·m^{-2}。2003—2022年有8个年份的太阳辐射低于多年平均值，分别是2003年、2010年、2011年、2012年、2015年、2016年、2019年和2020年，其余年份的辐照度均高于多年平均水平。

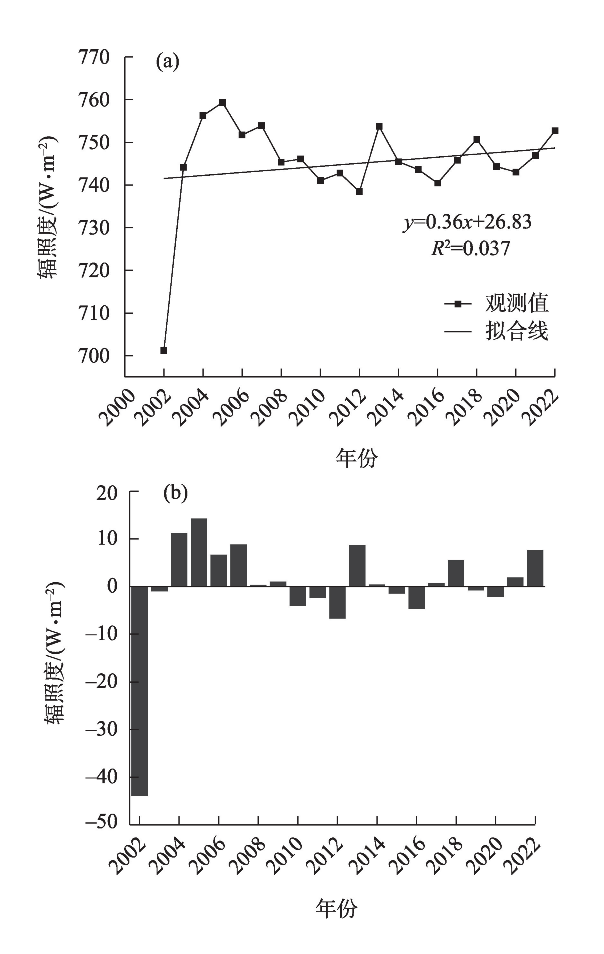


图5 无云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射年际变化(a)以及太阳辐射距平(b)

Fig. 5 Interannual variation (a) and anomaly (b) of solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2002−2022 under cloudless condition

2.2 有云条件下太阳辐射时空分布特征

2.2.1 空间分布特征 由图6可知，CERES太阳辐射从南向北随着纬度的增高而逐渐减小的趋势相比无云条件下更为明显。高值区域主要集中在青藏高原南部和阿富汗南部，最高值可达到788.72 W·m^{-2}，相比无云条件下最高值降低了239.84 W·m^{-2}。低值区位于天山山脉、巴基斯坦北部、塔吉克斯坦北部以及吉尔吉斯斯坦等地，最低为314.23 W·m^{-2}，比无云条件下最低值高出196.80 W·m^{-2}。研究区范围内太阳辐射变化幅度最高达474.49 W·m^{-2}，相比无云条件下降低了436.64 W·m^{-2}。此外，新疆天山山脉附近辐射变化较大，这是由于山地特别是迎风坡容易产生云，间接影响太阳辐射到达地面的总量，与此同时，天山南北坡坡向也会对太阳辐射产生影响[28]。总体而言，与无云条件下相比，有云条件下太阳辐射的最低值更高，最高值更低，整体辐射变化幅度有所减小。

由图7可知，夏季辐照度最大，春、秋季次之，冬季的辐照度最低。春季、夏季、秋季和冬季的辐照度平均值分别为681.66 W·m^{-2}、709.64 W·m^{-2}、529.17 W·m^{-2}、

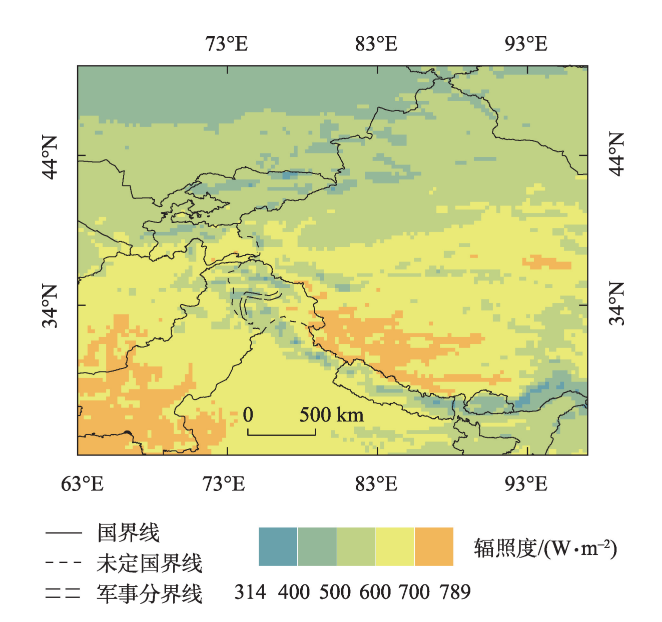


图6 有云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions from 2002 to 2022 under cloudy conditions

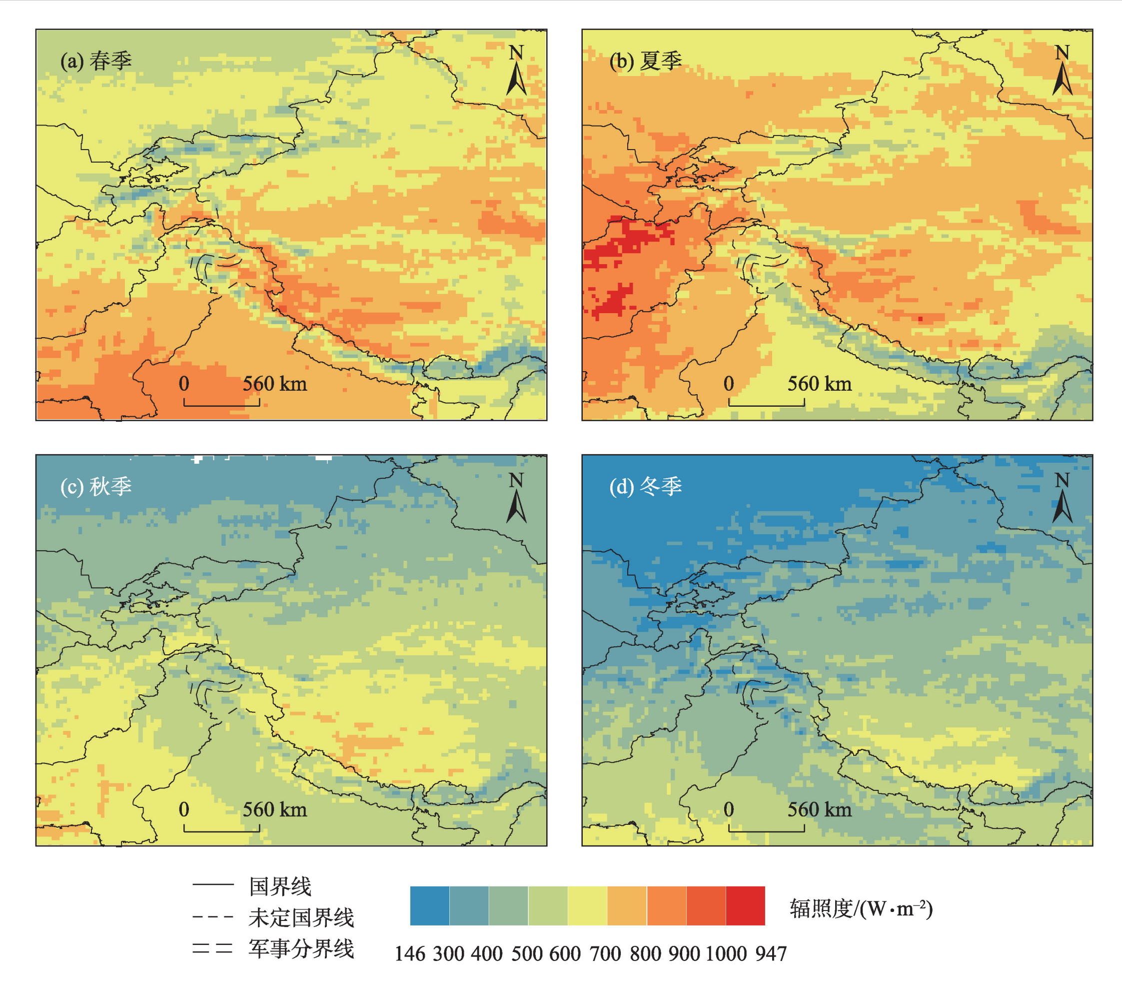


图7 有云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区季节太阳辐射空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2002-2022 under cloudy conditions

427.10 W·m^{-2},夏季比冬季辐照度高282.54 W·m^{-2}。四季辐照度的极差分别为655.62 W·m^{-2}(春季)、618.78 W·m^{-2}(夏季)、451.33 W·m^{-2}(秋季)和527.54 W·m^{-2}(冬季),表明春季和夏季地表太阳辐射的高低值分布较为离散,空间分布十分不均匀,而秋季地表太阳辐射值的集中度较高。由图8可以看出,5月、6月、7月和8月的辐照度的空间分布差异不大,其中5月的月均辐照度最高,为734.89 W·m^{-2},其次是6月、7月,辐照度分别为731.44 W·m^{-2}、707.83 W·m^{-2}。其余月份辐照度平均值都小于700 W·m^{-2}。辐照度最大值出现在6月,为1006.74 W·m^{-2},最小值出现在12月,为115.33 W·m^{-2}。

2.2.2 时间变化 由图9a可知,2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射辐照度的平均值为587.23 W·m^{-2},年均辐照度以0.39 W·m^{-2}的速率增长。2003—2022年年平均太阳辐射辐照度的最高值、最低值分别出现在2016年(599.70 W·m^{-2})和2010年(578.31 W·m^{-2}),两者之间的差值为21.39 W·m^{-2}。2007—2008年的太阳辐射变化最为剧烈,变化幅度达13.95 W·m^{-2},这一变化幅度相比无云条件下的辐射变化更为平缓。结合图9b可以看出,2003—2022年有8个年份太阳辐射低于多年平均值,分别是2003年、2008年、2009年、2010年、2011年、2012年、2014年和2019年,其余年份的太阳辐射均高于多年平均水平。

2.3 无云与有云条件下太阳辐射差异

2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区无云与有云条件下太阳辐射差值的空间分布如图10所示。大部分区域的辐射值在无云条件下高于有云条件,尤其是在天山山脉、青藏高原北部、昆仑山脉、喜马拉雅山脉、塔吉克斯坦、阿富汗东部等地势较高的地区,差值最大为505.76 W·m^{-2}。这一结果

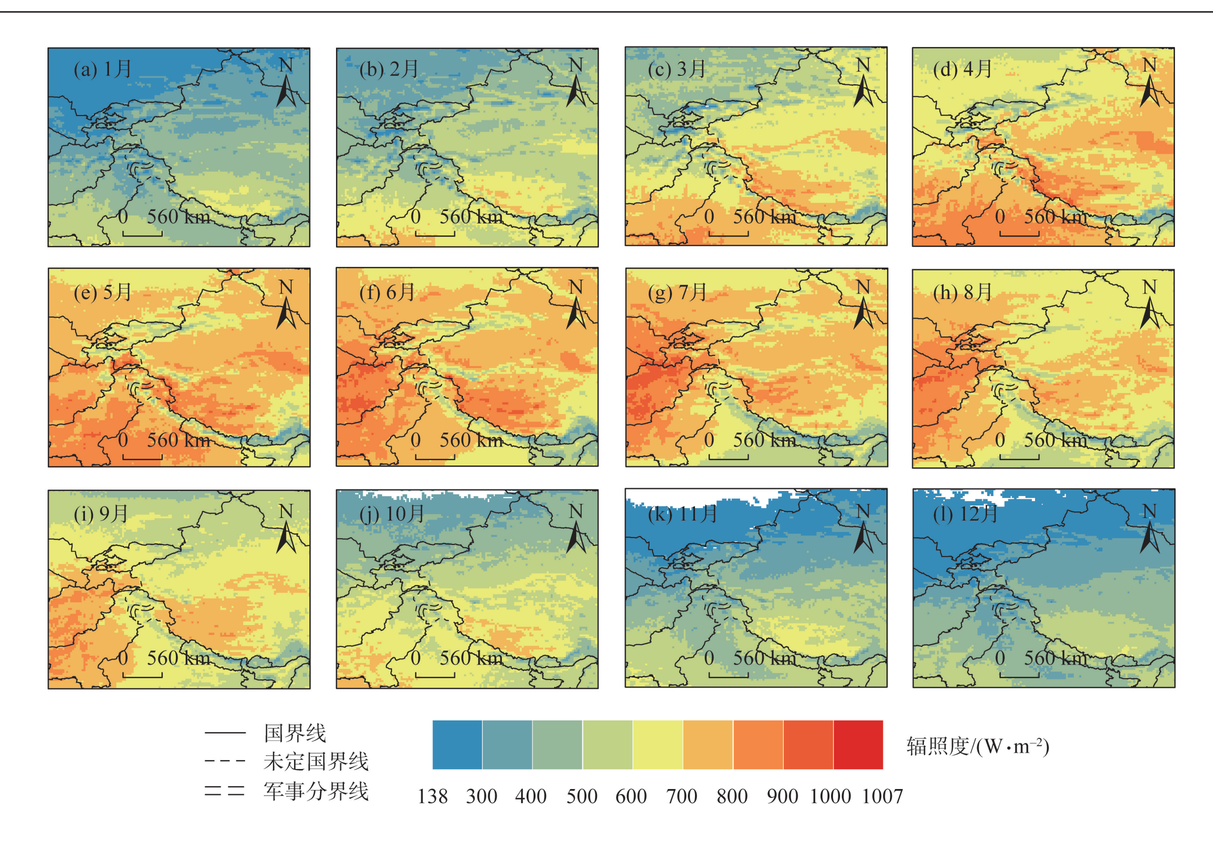


图8 有云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区月均太阳辐射空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of monthly mean solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2002–2022 under cloudy conditions

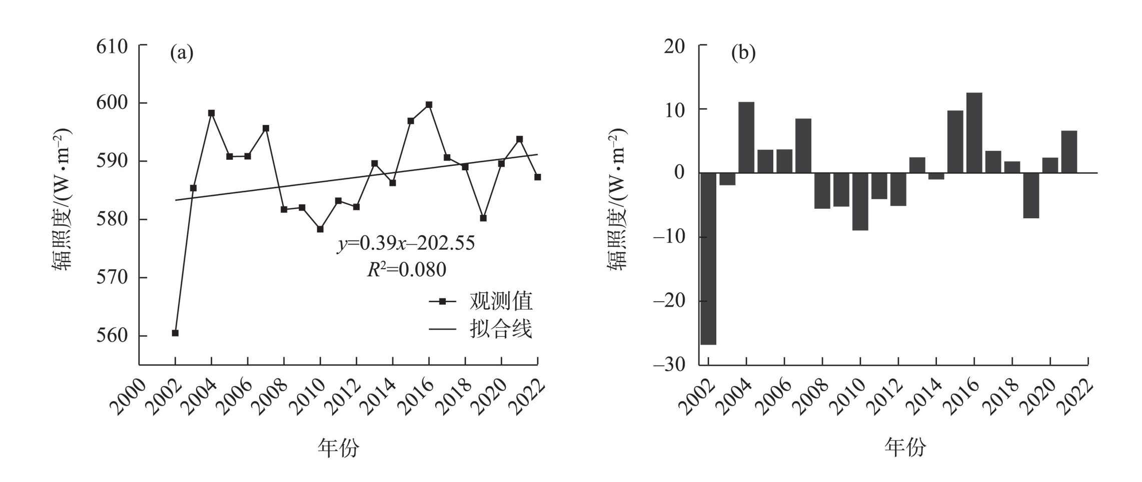


图9 有云条件下2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区太阳辐射年际变化(a)以及太阳辐射距平(b)

Fig. 9 Interannual variation (a) and anomaly (b) of solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2002–2022 under cloudy conditions

与陈光灿等[29]对青藏高原的研究一致,较非高原的陆面地区而言,青藏高原云的净辐射强迫冷却效应大,因为非高原陆面的地温高于高原的地表温度。差值较小的区域主要集中在巴基斯坦南部和印度西部,这些区域在有云条件下的太阳辐射比无云条件下太阳辐射低100~200 W·m^{-2}。在天山山脉和帕米尔高原等地,无云条件下的辐射值高于有云条件下,这是因为云除了可以散射和反射部分短波辐射外,还可以截获地面放出的辐射,产生局部加热作用[30-32]。

2021年新疆光伏电站总面积占中国光伏电站总面积的60%[33],光伏发展最为迅速,因此分析研

究区2019—2022年CERES无云太阳辐射与有云太阳辐射差值的空间分布,由图11可知,新疆大部分地区无云与有云太阳辐射差值范围为50~150 W·m^{-2},差值较大的区域主要集中在天山山脉和昆仑山脉等地势较高的地区。此外,新疆天山山脉附近存在无云太阳辐射低于有云太阳辐射的情况。

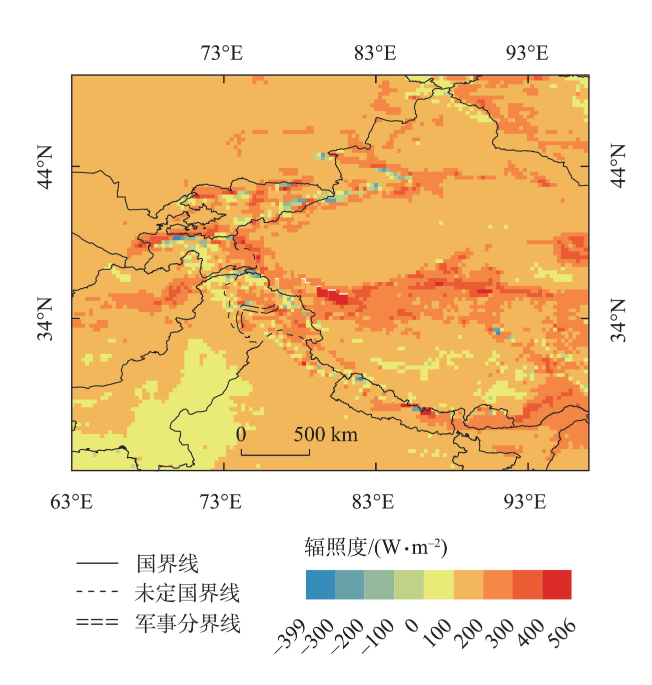


图10 2002—2022年新疆和周边"一带一路"地区无云太阳辐射与有云太阳辐射差值的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of difference between cloudless and cloudy solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2002-2022

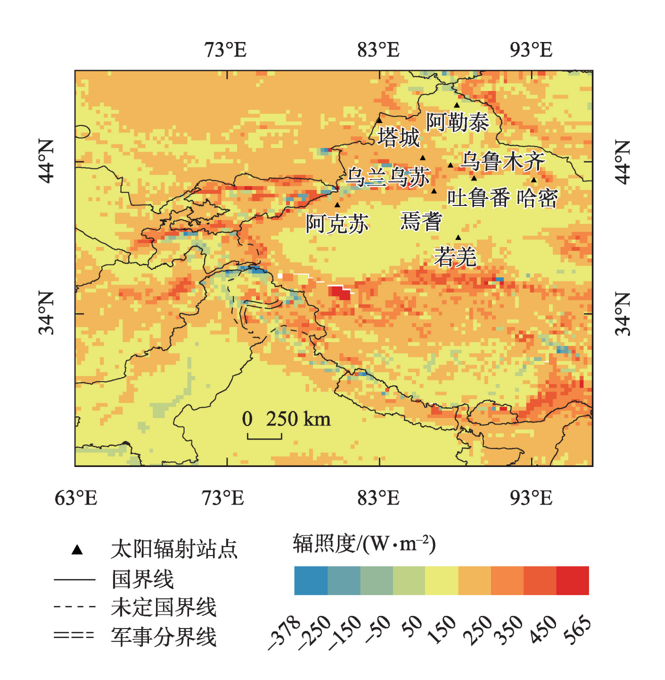


图11 2019—2022年新疆和周边"一带一路"地区无云太阳辐射与有云太阳辐射差值的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of the difference between cloudless and cloudy solar radiation in Xinjiang and the surrounding "Belt and Road" regions during 2019-2022

新疆对太阳辐射的地面观测站中,吐鲁番站、若羌和阿勒泰站的无云与有云太阳辐射差值在50~150 W·m^{-2},其余6个站点的差值则在150~250 W·m^{-2}。说明与吐鲁番站、若羌和阿勒泰站相比,其余站点的太阳辐射可能受到云层影响更为显著,因此,在这6个站点获取数据时格外要注意云的影响。

3 讨 论

本研究对新疆和周边"一带一路"地区在无云和有云条件下的太阳辐射时空变化进行了系统性分析。研究结果揭示了云对太阳辐射具有显著的影响,有云条件下的太阳辐射普遍低于无云条件。两种云天条件下,太阳辐射差值较大的区域主要分布在天山山脉、青藏高原北部、昆仑山脉、喜马拉雅山脉、塔吉克斯坦、阿富汗东部等地势较高的地区,差值最大达到505.76 W·m^{-2}。这是因为山区由于地形起伏,云出现的频率较高,尤其高山区,云出现的频率较平地更高,从而导致有云条件下太阳辐射降低,这与Xian等[34]的研究一致,特别是在青藏高原地区,地形对辐射的影响随着坡度的增加而变得更加显著。然而,本研究在对云的类型和特性对太阳辐射影响的深入探讨方面存在局限,乔楠等[35]探讨了不同高度的云对太阳辐射的影响,研究表明中低云对太阳总辐射的削弱作用较为显著,而高云层的影响则相对较小。此外,黎微微等[36]综合考虑了云和气溶胶的影响,研究显示云下气溶胶光学厚度(AOD)为0.1时,由反演误差所导致的地表太阳辐射估算误差较小。除了云层覆盖,其他环境因素如气溶胶、水汽、温度和降水也可能对太阳辐射产生重要影响。杨健博等[37]分析了天津地区不同季节不同天气(晴天、多云、霾)下,气溶胶辐射效应对太阳辐射的影响。王云鹏等[38]的研究揭示了最高温度、日照时数以及大气污染物中的SO_2和O_3对太阳辐射的影响。然而,本研究未能充分考虑这些因素,这可能限制了我们对太阳辐射综合影响机制的全面理解。

针对上述不足，未来研究需考虑结合不同类型云的光学特性和辐射效应，以更精确地量化云对太阳辐射的具体影响。此外，需开发综合模型，将气溶胶、水汽、温度、降水等环境因素纳入分析框架，以期全面评估上述因素对太阳辐射的综合影响。

4 结 论

本研究利用CERES Aqua FM3 Edition4A SSF数据对新疆和周边“一带一路”地区两种云天条件下地表太阳辐射时空变化特征的分析，得出以下结论：

（1）新疆南部、青藏高原、巴基斯坦中北部等地区在无云和有云条件下均表现出较高的太阳辐射值，而天山山脉、巴基斯坦北部、塔吉克斯坦北部等地区则为低值区。地势较高的地区如天山山脉、青藏高原北部、昆仑山脉等，无云与有云条件下的太阳辐射差异更为显著，最大差值可达505.76 $W\cdot m^{-2}$。这表明地形对太阳辐射的空间分布具有显著影响。

（2）无云和有云条件下的年均地表太阳辐射均呈现稳定增长，增长率分别为0.36 $W\cdot m^{-2}$和0.39 $W\cdot m^{-2}$。2003—2022年，年均辐照度最高值分别出现在2005年（759.32 $W\cdot m^{-2}$）、2016年（599.70 $W\cdot m^{-2}$），最低值分别出现在2016年（740.43 $W\cdot m^{-2}$）、2010年（578.31 $W\cdot m^{-2}$）。

（3）无云与有云条件下的太阳辐射最高值分别可达到1028.56 $W\cdot m^{-2}$、788.72 $W\cdot m^{-2}$，最低值分别为117.43 $W\cdot m^{-2}$、314.23 $W\cdot m^{-2}$。云层的存在显著降低了太阳辐射的最大值，并提高了最小值，减少了太阳辐射的年际变化幅度。

（4）研究区内大部分区域在无云条件下的辐照度比有云时高出100~200 $W\cdot m^{-2}$，而在地势较高的天山、青藏高原北部、昆仑山脉等地差值较大，差值达505.76 $W\cdot m^{-2}$。巴基斯坦南部和印度西部差值较小。吐鲁番、若羌和阿勒泰站差值在50~150 $W\cdot m^{-2}$范围内，其余6个站点差值在150~250 $W\cdot m^{-2}$范围内。

参考文献（References）：

[1] 刘强, 邓旭, 王博文, 等. “一带一路”沿线国家能源部门气候变化减缓技术需求评估[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 675-683. [Liu Qiang, Deng Xu, Wang Bowen, et al. Climate change mitigation technology needs assessment for energy sector in countries along the Belt and Road[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 675-683.]

[2] 肖佳, 梅琦, 黄晓琪, 等. “双碳”目标下我国光伏发电技术现状与发展趋势[J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(5): 64-69. [Xiao Jia, Mei Qi, Huang Xiaoqi, et al. Status quo and development trend of photovoltaic power-generating technology under the dual-carbon goal[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(5): 64-69.]

[3] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响：研究进展与展望[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 239-247. [Tian Zhengqing, Zhang Yong, Liu Xiang, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: Retrospect and prospect[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 239-247.]

[4] 刘莹, 任丽雯, 杨华, 等. 河西走廊东部太阳总辐射时空分布特征[J]. 中国农学通报, 2023, 39(20): 82-90. [Liu Ying, Ren Liwen, Yang Hua, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of total solar radiation in the east of Hexi Corridor[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(20): 82-90.]

[5] 顾玮, 古丽·加帕尔, 尹瀚民, 等. 新疆南疆地区太阳能资源时空分布特征及区划研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1665-1675. [Gu Wei, Guli Japaer, Yin Hanmin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic and division research of solar energy resources in southern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1665-1675.]

[6] 杨凤娟, 亢燕铭, 刘琼, 等. 新疆地面太阳辐射及其CERES/SSF卫星资料适用性研究[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1401-1410. [Yang Fengjuan, Kang Yanming, Liu Qiong, et al. Surface solar radiation in Xinjiang and the applicability of CERES/SSF satellite data[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1401-1410.]

[7] 于涵, 张杰, 刘诗梦. 基于CERES卫星资料的青藏高原有效辐射变化规律[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 106-122. [Yu Han, Zhang Jie, Liu Shimeng. The variation of effective radiation in Qinghai-Tibetan Plateau based on the CERES satellite data[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 106-122.]

[8] Habiba K, Muhammad Z. Estimation of solar radiation in southern areas of Pakistan using radiation models[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(4): 43701.

[9] Matuszko D. Infuence of the extent and general of cloud cover on solar radiation intensity[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(15): 2403-2414.

[10] Liu Y, Xia J, Shi C X, et al. An improved cloud classification algorithm for China's FY-2C multi-channel images using artificial neural network[J]. Sensors, 2009, 9(7): 5558-5579.

[11] Zhang J F, Kota W, Jun Y, et al. Short-period fluctuation and spatial distribution of solar irradiance under clouds[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57: 08RG12.

[12] 秦放, 李登宣, 丁煌, 等. 基于CERES数据分析中国云对地表太阳辐射影响特征[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 8-14. [Qin Fang,

Li Dengxuan, Ding Huang, et al. Chracteristics of surface solar radiation and cloud fraction in China based on CERES[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(9): 8-14.]

[13] Si Y W, Wang H Q, Wang Y J, et al. Effects of single-layer low clouds on the surface solar radiation in East Asia[J]. Solar Energy, 2021, 224: 1099-1106.

[14] 张淑花, 李新功, 李奇虎, 等. 提孜那甫河流域地表太阳辐射估算及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 734-745. [Zhang Shuhua, Li Xingong, Li Qihu, et al. Estimation of surface solar radiation and analysis of its influencing factors in the Tizinafu River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 734-745.]

[15] Chen S, Lu X, Miao Y F, et al. The potential of photovoltaics to power the Belt and Road Initiative[J]. Joule, 2019, 3(8): 1895-1912.

[16] 马新亮, 阿力木江·依民尼牙孜. 践行高质量发展理念:新疆太阳能产业的创新实践[J]. 中国外资, 2023(10): 27-29. [Ma Xinliang, Alimujiang Yiminniyazi. Practicing the concept of high-quality development: Innovative practices of the solar energy industry in Xinjiang[J]. Foreign Investment in China, 2023(10): 27-29.]

[17] 杨凤娟. 新疆晴空地表短波辐射的 Aqua/CERES/SSF 卫星反演资料误差及其气溶胶影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2019. [Yang Fengjuan. Study on Errors of Surface Shortwave Radiation from Aqua/CERES/SSF and its Aerosol's Influence under Clear-Sky in Xinjiang[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.]

[18] 马蓉蓉, 游庆龙, 蔡淼, 等. 基于 CERES 卫星资料分析近15 a云量变化[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 911-920. [Ma Rongrong, You Qinglong, Cai Miao, et al. The cloud variation over China in recent 15 years based on CERES satellite data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 911-920.]

[19] 张晓通. 全球陆表下行短波辐射和光合有效辐射反演算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. [Zhang Xiaotong. Estimation of Land Surface Incident Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.]

[20] 陈春美, 钟珂, 陈勇航, 等. 干旱区典型城市云对太阳辐射的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 436-443. [Chen Chunmei, Zhong Ke, Chen Yonghang, et al. Effects of clouds on solar radiation over typical city in Arid Area[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 436-443.]

[21] Gupta S K. The Langley Parameterized Shortwave Algorithm (lpsa) for Surface Radiation Budget Studies[M]. Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2001.

[22] Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, et al. Clouds and the earth's radiant energy system (ceres): Algorithm overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1127-1141.

[23] 刘琼. 上海地区气溶胶对低层暖云的影响机制及气溶胶-云辐射效应研究[D]. 上海: 东华大学, 2017. [Liu Qiong. Study on Influences of Aerosols on Lower Warm Cloud and Aerosol-Cloud Radiative Effect in Shanghai[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.]

[24] 黄家敏, 杨洪海, 陈勇航, 等. 基于GEWEX-SRB资料的新疆地区太阳辐射时空分布特征[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 516-523. [Huang Jiamin, Yang Honghai, Chen Yonghai, et al. Spatial and temporal distribution of solar radiation in Xingjiang area based on GEWEX-SRB data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(2): 516-523.]

[25] Huang Guan, Chen Yonghang, Li Zhengqiang, et al. Validation and accuracy analysis of the Collection 6.1 MODIS aerosol optical depth over the Westernmost City in China based on the sun-sky radiometer observations from SONET[J]. Earth and Space Science, 2020, 7: e2019EA001041.

[26] Huang Guan, Liu Qiong, Wang Yanyu, et al. The accuracy improvement of clear-sky surface shortwave radiation derived from CERES SSF dataset with a simulation analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 749: 141671.

[27] 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近20年太阳辐射时空分布状况模式评估[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 343-351. [Wu Qizhong, Wang Zifa, Cui Yingjie. Evaluating the solar radiation resources of China in recent 20 Years by meteorological model[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 343-351.]

[28] 庞明珠, 周黛怡, 陈勇航, 等. 基于CERES/Aqua卫星资料的新疆地面向下短波辐射时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 9-15. [Pang Mingzhu, Zhou Daiyi, Chen Yonghang, et al. Spatial and temporal distribution of downward surface shortwave in Xinjiang based on CERES/Aqua data[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 9-15.]

[29] 陈光灿, 李函璐, 傅云飞. 利用MODIS和CERES遥感数据研究青藏高原的云辐射强迫效应[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 15-27. [Chen Guangcan, Li Hanlu, Fu Yunfei. The analysis of the cloud's radiative forcing effect over Qinghai-Xizang Plateau based on MODIS and CERES data[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(1): 15-27.]

[30] Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. The effect of cloud type on earth's energy balance: Global analysis[J]. Journal of Climate, 1992, 5: 1281-1304.

[31] Bony S, Stevens B, Frierson D M W, et al. Clouds, circulation and climate sensitivity[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(4): 261-268.

[32] Zelinka M D, Randall D A, Webb M J, et al. Clearing clouds of uncertainty[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(10): 674-678.

[33] 卢潇楠, 李国庆, 杨凯迪, 等. 2010—2021年中国光伏电站的空间分布及时空变化分析[J]. 太阳能, 2023, 44(11): 5-11. [Lu Xiaonan, Li Guoqing, Yang Kaidi, et al. Analysis of spatial distribution and spatiotemporal changes of PV power stations in China from 2010 to 2021[J]. Solar Energy, 2023, 44(11): 5-11.]

[34] Xian Y, Wang T, Leng W, et al. Can topographic effects on solar radiation be ignored: Evidence from the Tibetan Plateau[J]. Geo-

physical Research Letters, 2024, 51(6): e2024GL108653.

[35] 乔楠, 蒋波涛, 郑雨, 等. 基于深度模糊神经网络的太阳总辐射预测研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 59−64. [Qiao Nan, Jiang Botao, Zheng Yu, et al. Research on global solar radiation forecast based on deep fuzzy neural network[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 59−64.]

[36] 黎微微, 胡斯勒图, 陈洪滨, 等. 利用MODIS资料计算不同云天条件下的地表太阳辐射[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 643−650. [Li Weiwei, Husi Letu, Chen Hongbin, et al. Estimation of surface solar radiation using MODIS satellite data and RSTAR model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 643−650.]

[37] 杨健博, 蔡子颖, 杨旭, 等. 气溶胶辐射效应对气象和环境影响的观测与模拟研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 38−51. [Yang Jianbo, Cai Ziying, Yang Xu, et al. Observation and modeling study of the influence of aerosol radiation effect on meteorology and environment[J]. China Environmental Science, 2023, 43(1): 38−51.]

[38] 王云鹏, 李红英, 姚玉璧, 等. 敦煌太阳总辐射多时间尺度变化特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1885−1897. [Wang Yunpeng, Li Hongying, Yao Yubi, et al. Multi-time scale change characteristics and influencing factors of total solar radiation in Dunhuang City[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1885−1897.]

Analysis of surface solar radiation under different cloud conditions in Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions

SUN Linlin[1], LIU Qiong[1], HUANG Guan[2], CHEN Yonghang[1], WEI Xin[1], GUO Yulin[3], ZHANG Taixi[3], GAO Tianyi[1], XU Yunhong[1]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. School of Tourism, Research Institute of Human Geography, Xi’an International Studies University, Xi’an 710128, Shaanxi, China; 3. Climate Center of Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The spatial-temporal changes in surface solar radiation from 2002 to 2022 in Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions under cloudless and cloudy conditions were compared using the CERES Aqua FM3 Edition4A SSF data set. Under both cloud conditions, the annual mean surface solar radiation was highest in the southern Xinjiang, Qinghai-Xizang Plateau, and central and northern Pakistan. The maximum irradiance under cloudless and cloudy conditions was 1029 $W\cdot m^{-2}$ and 789 $W\cdot m^{-2}$, respectively. The regions of lowest solar irradiance, with the lowest values being 117 $W\cdot m^{-2}$ under cloudless and 314 $W\cdot m^{-2}$ under cloudy conditions, are primarily located in Tianshan Mountains, northern Pakistan, and northern Tajikistan. These figures indicate that the variation in solar radiation is relatively smaller under cloudy conditions. The average annual solar radiation in the study area for cloudless and cloudy conditions increased at the rate of 0.36 $W\cdot m^{-2}$ and 0.39 $W\cdot m^{-2}$ from 2002 to 2022, respectively. From 2003 to 2022, the highest values of annual average irradiance under cloudless and cloudy conditions occurred in 2005 (759.32 $W\cdot m^{-2}$) and 2016 (599.70 $W\cdot m^{-2}$), respectively. The difference in solar radiation between the nine ground stations under cloud conditions (excluding Turpan and Altai stations) ranged from 50 to 150 $W\cdot m^{-2}$; the irradiance values at the remaining stations ranged from 150 to 250 $W\cdot m^{-2}$. The irradiance in most areas was 100−200 $W\cdot m^{-2}$ higher without cloud cover, and the regions where the difference is significant are primarily the Tianshan Mountains, northern Qinghai-Xizang Plateau, and Kunlun Mountain, with the largest difference of 505.76 $W\cdot m^{-2}$.

Keywords: surface solar radiation; cloud; spatial-temporal changes; CERES; Xinjiang and the surrounding “Belt and Road” regions